中性原子成像仪地检电子系统的研制

明晨曦[1,2]，余庆龙[1]，梁金宝[1]，张焕新[1]，荆 涛[1]
（1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190；2. 中国科学院大学 北京 100190）

摘要：本文介绍了 MIT 卫星计划中性原子成像仪(NAIS-H)的基本结构以及工作原理，通过分析 MIT 卫星 NAIS-H 的工作原理及测试需求，设计并实现了基于该成像仪的地面检测，包括硬件电路系统及上位机软件系统。本文分别从通讯、数据处理等方面，描述了地检系统的主要结构设计以及工作流程，并详述了上位机系统中串口通讯、数据解包、图像处理等各软件模块设计以及 java 代码编写。最后，对地检系统进行测试，得到的结果显示该系统具有良好的性能，达到了设计要求。

关键词：能量中性原子；地面检测；Java 通信；图像算法

中图分类号：TN4 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-6236(2016)04-0190-04

Ground test equipment for neutral atom imaging system-high

MING Chen-xi[1,2], YU Qing-long[1], LIANG Jin-bao[1], ZHANG Huan-xin[1], JING Tao[1]
(1. *CSSAR*, *CAS*, *Beijing* 100190, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: This paper introduces the structure and working principle of the Neutral Atom Imaging System-High (NAIS-H) which is in the MIT project. Based on the testing needs of the instrument, we have designed ground test equipment, including the circuit system and the host computer system. In this paper, we show the structure and working principle of the ground test for NAIS-H, and tell structure and java programming of the sub modules of the host computer system in detail, such as API communicating system, data analyzing system and data saving system. At last, we test the equipment, and the result shows the ground test system has good performance and achieves the design requirement.

Key words: energy neutral atoms; ground test; java program; image algorithm

DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2016.04.058

MIT 计划是我国首个磁层、电离层和热层耦合星座探测计划，主要目标是对近地磁层中 MIT 耦合关键区域进行探测，揭示太阳活动影响地球空间环境的机制和规律。在卫星探测环境中，环电流区域由能量带电粒子在径向范围 2 到 7 个地球半径内绕地球漂移而形成，是磁层中最重要的中性原子源区之一[1]。环电流区内的能量中性粒子在产生后，由于其电中性的特性，运动方向不受磁场影响，在空间中传播收到扰动很小[2]。因此，可以采用遥感技术对环电流源区进行高时空分辨率遥感成像观测，从而反演得到源区带电粒子分布及其在磁暴期间的时空演化规律[3-7]。

空间中心目前正在研制的高能中性原子成像仪(NAIS-H)是先导专项 MIT 卫星计划中最重要的载荷之一。NAIS-H 采用高压偏转加准直调制技术，通过 30 个方向探头，将 180°空间分成 30 个等分视场，利用卫星的自旋，可实现空间 4π 立体角全覆盖成像。NAIS-H 具有在不同磁层环境下探测高时空分辨环电流区的中性原子（其能量分布在 40~300 KeV）图像的能力。探测器的组成包括准直器、高压偏转板和硅半导体探测器。在仪器对中性原子聚集区域进行探测时，中性原子粒子入射到探测器中，打在探测器内的传感器上，产生电信号。电信号通过电子学处理及采集，在数据处理单元(DPU）中形成图象并下行到卫星平台[8]。本文基于 MIT 计划中高能中性原子成像仪(NAIS-H)，设计了其地面检测系统电路，以及上位机软件系统，并对 NAIS-H 进行了测试，得到实验结果。

1 NAIS-H 系统结构与工作原理

如图 1 所示是 NAIS-H 仪器外观，如图 2 所示为 NAIS-H 系统结构示意图。整个 NAIS-H 系统是 MIT 卫星上的载荷，系统由卫星平台进行统一供电。在 NAIS-H 系统前端，有 30 个中性原子探头，将空间视角分成 30 个等分视场，通过卫星的自旋，实现全面观测空间 4π 立体角。中性原子通过高压偏转板进入探测器内，打在传感器上。传感器接收到中性原子探测信号后，通过前向放大器、主放大器、尖峰保持系统、模数转换等信号处理模块后，数据被传送至以 FPGA 为核心的数据处理中心。

数据处理中心的主要任务是处理传感器探头探测到的数据，以及与卫星总体之间的数据通讯。在接收到传感器上的探测数据后，数据处理中心会将数据统一打包，经由 RS422 总线发送至卫星平台。另外，FPGA 的工作状态还受到卫星平

收稿日期：2015-03-30 稿件编号：201503427
作者简介：明晨曦(1990—)，女，湖北武汉人，硕士研究生。研究方向：空间环境中高能粒子探测电子学。

台发送的太阳脉冲信号的控制,当卫星进入地影区时,卫星平台无法向 NAIS-H 发送太阳脉冲,这时则需要 NAIS-H 自行产生太阳脉冲信号控制自身的工作。

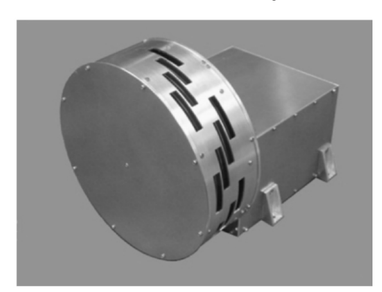


图 1　中性原子成像仪外观
Fig. 1　Appearance of NAIS-H

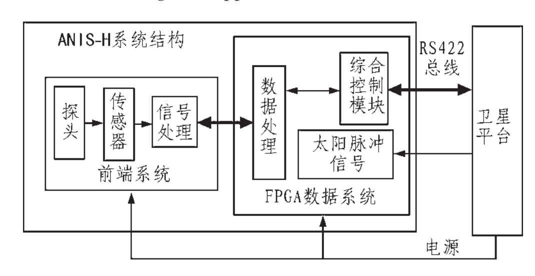


图 2　中性原子成像仪系统结构示意图
Fig. 2　Structure diagram of NAIS-H system

由于 NAIS-H 在研制及测试过程中不具备与卫星平台联调条件,因此需要根据 NAIS-H 的研制一套地检设备。本文即描述了针对 NAIS-H 的地检系统设备与软件的研制方案与测试结果。

2　地检系统功能需求

2.1　地检系统总体结构

地检系统的主要目的是模拟 NAIS-H 系统在太空正常工作时,卫星平台与 NAIS-H 的交互与数据处理。根据图 2 中对 NAIS-H 工作原理的描述,我们对地检系统设定了 3 个主要功能需求:1)电源配电功能,2)数据通讯功能,3)模拟太阳脉冲。根据这 3 大功能需求,我们对地检系统进行了总体结构方案设计。NAIS-H 地检系统结构如图 3 所示,地检系统中的配电模块,通过数控开关,向 NAIS-H 的各模块提供 28 V 的一次电源;科学数据模块通过 RS422 总线与 NAIS-H 相连,用于对 NAIS-H 探头所采集到的数据包与相应的查询指令进行统一的收发、转存;太阳脉冲模块则向 NAIS-H 提供模拟的 6 s 一周期的脉冲信号,并且模拟卫星进入地影区时,中断发送太阳脉冲的行为。

上位机软件模块负责接收、显示分析与存储 NAIS-H 发送而来的探测数据。上位机通过 RS422 总线转 USB 接口与科学数据模块相连,实现了硬件系统与上位机之间的通讯。上位机的串口通讯模块负责实现控制信号的发送、数据包的接收;数据解包模块负责解析数据,将数据存储在缓存中;存储显示模块负责对缓存中的数据进行作图显示与本地存储,并且可随时读取本地数据并作图显示。

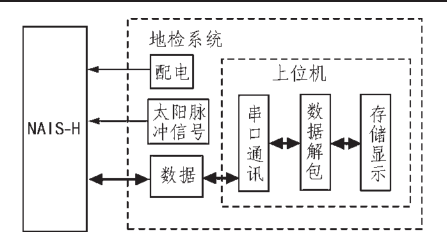


图 3　中性原子成像仪地检系统结构图
Fig. 3　Structure diagram of the ground test equipment for NAIS-H

2.2　软件需求分析

本项目中的上位机软件的主要任务是接收来自 NAIS-H 的探测数据以及工程参数,并对接收到的数据实现实时分析、作图显示、同步存储、读取等基本功能。所以,软件系统必须以 NAIS-H 的科学数据接口,即数据包结构以及通讯协议为前提,为中性原子探测所需功能提供相应支持。经过分析,对于 NAIS-H 所探测到的数据,该上位机软件系统主要需具备以下几个功能:

1)串口通讯,以波特率 115 200 的速率接收 NAIS-H 发送来的数据包;

2)数据解包,提取出工程参数,以及 8 个能道、30 个探头所探测到的数据;

3)实时显示工程参数,并将探测数据转换成 RGB 图像,精确显示在界面中,并实现在图像界面中快速查看数据值;

4)将接收到的数据以 txt 文件存储在目标文件夹中,以及从计算机中导入数据文件作图显示。

根据对软件功能的需求分析,上位机将程序设计分为API通讯模块、数据解包模块、显示模块、存储模块,如图 4 所示。软件的详细设计流程如图 5 所示,当打开程序主界面,系统经过初始化后,打开串口,上位机则向 NAIS-H 发送通讯指令,NAIS-H 收到指令后则返回当前探测数据包。当上位机的串口检测到有数据输入时,软件系统则检验所接收到的数据是否是正确的数据包。若为正确数据包,则将数据包中的每一字节的数据存入缓存的对应位置,并将原数据包存储在目标路径下,最后进行解包分析,以及作图显示等。

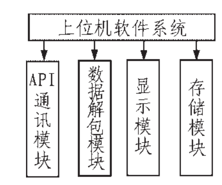


图 4　软件系统设计结构图
Fig. 4　Schematic diagram of the software test system

3　软件模块设计与实现

3.1　串口通讯

该上位机软件系统中采用 java API 技术,经由 RS422 转 USB 接口,将 NAIS-H 所采集的数据包暂存于上位机缓存中。地检系统中的硬件模块通过 RS422 总线转 USB 接口,使 PC端对系统数据的获取可直接通过 USB 模块实现。接口芯片为

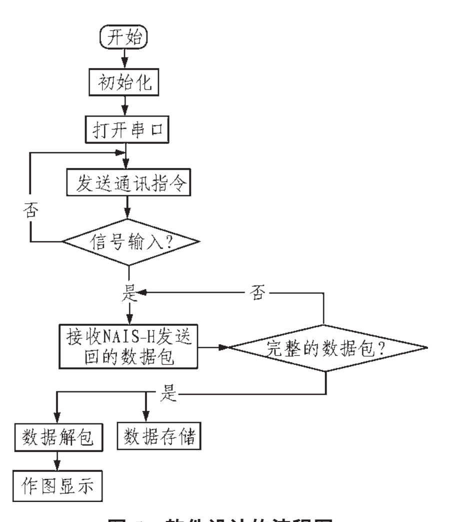


图 5　软件设计的流程图

Fig. 5　Flow chart the software design

CH341H，串口收发数据包定义：1 位起始位，8 位数据，1 位停止位，波特率 115 200。以 30 775 Byte/包的数据包发送给上位机。

上位机与 NAIS-H 设定了通讯协议，上位机向 NAIS-H 发送控制信号，NAIS-H 收到信号后当上位机则向上位机发送探测结果数据包。上位机接收到数据后，按照约定的格式及校验方式对数据包进行校验，若判断为正确的数据包，则将其存入缓存中，等待数据解包等后续操作，否则进行丢包处理。此外，在串口通讯中，程序通过调用不同功能函数，函数分别实现了单次实时接收以及持续接收功能。

3.2　数据解包

上位机接收到正确的数据包后，将数据存储在缓存数组(buffer[])中，原数据包直接完整地存储至本地，数据解包的执行对象为缓存中的数据。

发送的数据包结构及内容如表 1 所示。表 1 中的第一列是数据包中的主要结构内容，包括了包头、工程参数、探测数据、包尾 4 个部分。其中，包头与包尾用来识别及操作完整、正确的数据包；工程参数包括两个部分——NAIS-H 中 16 个监测点的监测值，以及 30 个探头通道的传感器噪声；探测到的结果信息包括 8 个能道，对于每能道，30 个探头分别有128 Byte 的探测数据，共 3 840 Byte 数据，每一个字节存储一次探测数据，为 NAIS-H 所探测到的空间环境里中性原子通量，以 8 位无符号 16 进制整型数表示，范围为 0~FF(255)。

3.3　界面显示

根据显示功能的需求，在界面设计上，主界面共有 3 个部分组成：1)工具栏，2)工程参数显示，3)8 个能道数据作图。上位机主界面如图 6 所示，其中工具栏在界面的最上方，其中分别有“打开串口”、“接收数据”、“读取数据”等按钮，图中的小窗口即为数据包中的工程参数，以 16 进制数据的字符串格式显示。界面中央为 NAIS-H 探测结果显示图，在一个数据包内，探测数据包括 8 个能道的数据，每能道包括 30 个探头的数据， 每个探头包括卫星自旋一周时扫描采样的 128 个数据。显示模块以能道为单位，分别做出 8 幅数据图，即每图中

表1　中性原子成像仪数据包格式

Tab.1　Data package format of NAIS-H

包内容	字节数/byte	含义
同步头	2	包头同步码 FF
识别码	1	识别数据包类型
包序号	1	标识数据包序号
时间码	3	标识数据包生成时刻
工参-状态参数	16	各模块电压、电流等参数值
工参-噪声参数	30	30 个探头的噪声参数监测值
能道数据 1	30*128=3 840	能道 1 探测数据
能道数据 2	3 840	能道 2 探测数据
……	……	……
能道数据 8	3 840	能道 8 探测数据
校验和	1	包数据校验信息
包尾	1	包尾识别码 FE

有 30*128=3 840 个数据。每个数据均由比特数值映射到 RGB 颜色值，最终以 RGB 图显示出来。除了直接以颜色显示数据之外，主界面上还实现了直接显示当前数据值的功能。当鼠标悬停在图片中的某一像素上时，工具栏的最右边即可显示当前所在的具体坐标，以及该点的具体探测数值。

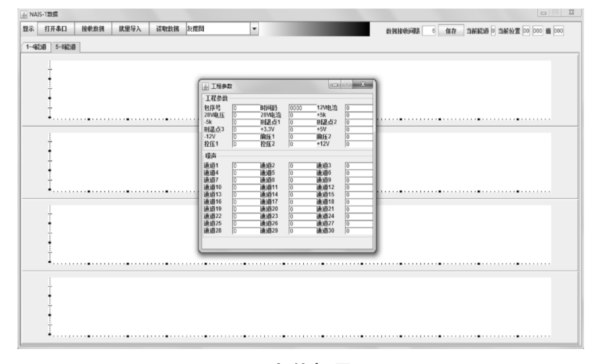


图 6　上位机界面图

Fig. 6　Interface chart of the PC system

3.4　色彩映射算法

数据包中的探测结果数据范围在 0~255 之间，上位机数据处理系统将其转化成 RGB 图。由于上位机中对颜色的定义采用 RGB 值方式，即调用 Color(int r，int g，int b)函数，使用 r，g，b 三维向量来唯一表示一个颜色，其中 r、g、b 取值范围均为 0~255。对于色彩映射的算法，本项目中采用了灰度图算法和彩色图算法两种方式。

1)灰度图算法

灰度图中各颜色值的 r、g、b 分量相等，均为接收到的探测结果值，即探测结果值 result(0~255)对应颜色值 Color(result，result，result)。该算法的 RGB 色彩值取值范围为 Color(0，0，0)，Color(1，1，1)，… Color(255，255，255)，颜色由白色至黑色依次变深，所以，可以直接根据灰度的深浅来直观看出图中各点值的大小关系。

2)彩色图算法

灰度图虽然可以直观地表示各数据之间的大小关系，却

不易看出某个数据所处的数据段。由于人眼对灰度深浅的敏感度不及对彩色色调的敏感度强，所以除了灰度图外，我们还采用了RGB彩色图算法来表示数据。在普通RGB彩色图中，r、g、b分别表示红、绿、蓝3种颜色通道的强度，通过对3个通道颜色的叠加来得到整体颜色。

上位机软件采用如下算法，使得由探测值映射的RGB值在颜色空间中均匀分布：将整个颜色空间按色调分成5个部分，每个部分之间的视觉区分度较大。并将探测值的结果域分成5个部分，对于每一个探测值，先根据数据值判断其属于颜色空间中的哪一部分，再根据其在该部分的偏移量来确定RGB颜色的精确值。该算法将颜色空间所分成的5个部分，每个部分的色调不同，分别为黄、橙、红、紫、蓝色。整体颜色变化在视觉更加容易分辨，也可根据颜色直接判断该值所处的数据段，该功能对于宏观观测数据分布有很大帮助。

4　测试结果及分析

在进行测试前，按正确方式连接好仪器硬件电路及上位机。启动上位机程序后，点击界面中的接收数据按钮，并选择接收数据方式，即可测试NAIS-H探测结果。我们在实验室中对仪器进行测试，采用了灰度图算法来显示数据，测试结果如图7和图8所示。



图7　单一探头探测结果图

Fig. 7　Result picture of the single probe

如图7所示，结果图像为实验室中对NAIS-H单个探头给予放射源照射时地检系统所得到的数据结果。实验人员对NAIS-H仪器上的第25探头进行了测试，NAIS-H根据一个探测周期6 s内的图像，生成了128个时分像素，每个像素等效于探头扫过2.81°的探测结果。图7中图像在纵坐标为26处成一条直线，即第26探头在一个探测周期6 s内持续有探测结果，且探测数据一致。该结果符合预期。

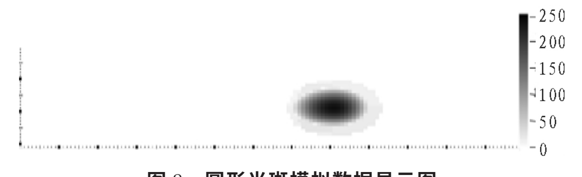


图8　圆形光斑模拟数据显示图

Fig. 8　The simulated picture of

如图8所示，为实验室模拟的完整中性原子探测数据。模拟目标源为球形放射源，放射源中心亮度大、边缘亮度小。当探头扫过放射源时，探测到放射源边缘数据，随着探头扫向放射源中心，探测数据不断变大，之后随着探头离开放射源，探测数据变小。且位置高度与放射源越接近的探头，所得到的整体探测数据越大。图8所示的结果中，以(18，80)处的探测数据值最大，图像数据整体呈椭圆形，且越接近边缘的数据越小，符合预期结果。

通过了对单个探头对平行放射源的测试结果与整个NAIS-H对球形放射源模拟探测结果数据的成像，我们所得到的实验结果符合要求，进而验证了地检软件系统对图像处理的能力。另外，每张图都有灰度图与彩色图两种显示方式，且图上有刻度标记，并且当鼠标悬停在某一像素点上时，主界面中会显示出该点的探测数据值。所以，该上位机软件系统，既能实现从色彩上宏观进行数据分析，又能实现对任意具体数据实时查询。

5　结　论

该地检系统采用FPGA作为数据通讯硬件基础，软件设计采用模块化设计思想，基于Java语言，提高了系统的可靠性、可维护性以及可移植性，并且为下一步将上位机移植至Android系统提供了良好的结构及代码基础。目前该测试系统已应用于NAIS-H地面检测，在实际应用中表明该系统具有测试准确、稳定可靠、界面友好、操作方便等特点。

参考文献:

[1] Daglis I A，Thorne R M，Baumjohann W，et al. The terrestrial ring current:Origin，formation，and decay[J]. Reviews of Geophysics，1999，37(4):407–438.

[2] Roelof E C，Mitchell D G，Williams D J. Energetic neutral atoms(E~50 keV)from the ring current:IMP 7/8 and ISEE 1[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics(1978–2012)，1985，90(A11):10991–11008.

[3] Lui A T Y，Williams D J，Roelof E C，et al. First composition measurements of energetic neutral atoms[J]. Geophysical Research Letters，1996，23(19):2641-2644.

[4] Le G，Russell C T，Takahashi K. Morphology of the ring current derived from magnetic field observations[C]//Annales Geophysicae，2004:1267–1295.

[5] 陈志青，沈超，路立，等. 基于中性原子通量数据的磁暴期间环电流研究[J]. 地球物理学报，2012，55(3):727–737.

[6] 沈超，刘振兴. 环电流区中性原子观测特性模拟研究[J]. 地球物理学报，2003，46(1):1–10.

[7] 王馨悦，刘振兴，沈超，等. 代数重建法反演环电流分布的初步结果[J]. 空间科学学报，2007，27(2):104–109.

[8] Mitchell D G，Jaskulek S E，Schlemm C E，et al. High energy neutral atom (HENA)imager for the IMAGE mission[C]//The IMAGE Mission. Springer Netherlands，2000:67–112.